

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт
Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Е.Косенко
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2019г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Рациональное проектирование тонкостенных оболочечных конструкций для
космических аппаратов»
тема

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных
производств»
код и наименование направления

15.04.05.02 «Технология космических аппаратов»
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель	_____	канд. техн. наук, доцент МБК ПФиКТ	В.Н. Наговицин
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		О.Б. Гоцелюк
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	начальник сектора	М.Ю. Пермяков
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____		Е.С. Сидорова
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Красноярск 2019

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт
Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия
«05» октября 2017г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Студенту: Гоцелюк Ольге Борисовне

Группа: МТ 17-04 М

Направление 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Специализированная программа подготовки: 15.04.05.02 «Технология космических аппаратов».

Тема выпускной квалификационной работы (МД): «Рациональное проектирование тонкостенных оболочечных конструкций для космических аппаратов».

Утверждена приказом по университету от «___» _____ 20__ г. № _____

Руководитель ВКР: В.Н. Наговицин канд. техн. наук., доцент МБК ПФиКТ

Исходные данные для ВКР: провести анализ имеющегося научно-технического задела и разработать конструкции длинномерных трансформируемых штыревых элементов для космических аппаратов.

Перечень разделов МД:

- 1 Методы расчета оболочечных конструкций в применении к расчету ленточного штыря.
- 2 Устойчивость упругих систем.
- 3 Рациональное проектирование геометрических параметров ленточного штыря чечевицеобразного сечения.
- 4 Анализ результатов расчета.

Руководитель ВКР

подпись

В.Н. Наговицин

Задание принял к исполнению

подпись

О.Б. Гоцелюк

« 05 » октября 2017 г.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «Рациональное проектирование тонкостенных оболочечных конструкций для космических аппаратов» содержит 83 страницы текстового документа, 30 использованных источника, 39 рисунков, 17 таблиц.

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ СИСТЕМЫ, РАСКРЫВАЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЛЕНТОЧНЫЙ ШТЫРЬ, ЧЕЧЕВИЧНОЕ СЕЧЕНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, НАПРЯЖЕНИЕ, ДЕФОРМАЦИЯ, УСТОЙЧИВОСТЬ.

В работе рассматривается проблема проектирования ленточных штырей, представляющих собой конструкцию с изменяемой геометрией при переводе из сложенного положения и обратно.

Цель работы – решение важной научно-технической задачи определения рациональных конструктивных параметров ленточного штыря.

Актуальность работы определяется все большей востребованностью крупногабаритных трансформируемых систем и желанием уйти от использования классических шарниров в таких конструкциях.

В ходе написания работы была собрана и проанализирована конструкторская документация имеющихся на предприятии разработок использующихся в качестве раскрывающих элементов ленточных штырей.

В первом разделе работы представлен анализ существующих методов расчета оболочек. Рассмотрены аналитические и численные методы. Проанализирована эффективность их использования.

Во втором разделе представлена информация по основам устойчивости упругих систем, представлены существующие методы отыскания критических нагрузок.

Третья часть работы посвящена описанию рассматриваемой конструкции ленточного штыря чечевичного сечения и ее особенностям. Определены геометрические характеристики ленточного штыря чечевичного сечения.

Проведены расчеты допустимых нагрузок действующих в процессе эксплуатации ленточный штырь в различных исполнениях. Предложена доработка конструкции устройства выдвижения штыря для повышения допустимых нагрузок.

В четвертом разделе дан анализ проведенных расчетов. Определены удельный изгибающий момент и удельная критическая сжимающая сила для всех вариантов исполнения ленточного штыря и устройства выдвижения.

Результаты работы повысили качество проектирования раскрывающихся изделий и могут быть использованы для дальнейших разработок перспективных конструкций с рациональной конфигурацией в зависимости от вида нагружения.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	8
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	78
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	79
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	80
Введение.....	8
1 Методы расчета оболочечных конструкций в применении к расчету ленточного штыря.....	12
1.1 Теория плоских пластин.....	12
1.2 Общая моментная теория оболочек вращения.....	13
1.3 Аналитические методы расчёта оболочек чечевичного сечения.....	15
1.4 Численные методы расчета оболочек чечевичного сечения.....	18
1.4.1 Метод ортогональной прогонки Годунова.....	19
1.4.2 Метод конечных разностей.....	19
1.4.3 Метод граничных элементов.....	20
1.4.4 Метод конечных элементов.....	22
2 Устойчивость упругих систем.....	25
3 Рациональное проектирование геометрических параметров ленточного штыря чечевичного сечения.....	32
3.1 Описание конструкции ленточного штыря.....	32
3.2 Определение характеристик чечевичного профиля по напряжениям изгиба, возникающим при переводе в транспортировочное положение...39	39
3.3 Определение геометрических характеристик профиля чечевичного сечения в рабочем положении.....	42
3.4 Оценка допустимых нагрузок действующих на ленточный штырь в рабочем положении без учета зоны формирования чечевичного сечения44	44
3.4.1 Оценка максимально допустимого изгибающего момента.....	44
3.4.2 Оценка критической сжимающей силы.....	46
3.5 Оценка допустимых нагрузок действующих на ленточный штырь в рабочем положении с учетом зоны формирования чечевичного сечения.48	48
3.5.1 Описание конечно-элементной модели.....	48

3.5.2 Теории прочности принятые в расчетах напряженно-деформированного состояния ленточного штыря чечевичного сечения.....	51
3.5.3 Верификация модели.....	52
3.5.4 Оценка максимально допустимого изгибающего момента.....	57
3.5.5 Оценка критической сжимающей силы.....	60
3.6 Оценка допустимых нагрузок действующих на ленточный штырь в рабочем положении с учетом зоны формирования чечевичного сечения и дополнительного закрепления.....	64
3.6.1 Описание конечно-элементной модели.....	64
3.6.2 Оценка максимально допустимого изгибающего момента.....	65
3.6.3 Оценка критической сжимающей силы.....	70
4 Анализ результатов расчета.....	75
Заключение.....	78
Список сокращений.....	79
Список использованных источников.....	80

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие космической техники привело к необходимости увеличения размеров космических аппаратов и его систем в рабочем положении и в то же время, уменьшению массы и габаритов выводимого на орбиту груза. Такое противоречие привело к бурному развитию крупногабаритных трансформируемых систем различного назначения, в основе которых находятся раскрываемые конструкции.

Раскрываемые конструкции это конструкции, которые могут кардинально изменять свою конфигурацию автономно. То есть из сложенного, компактного состояния изменяться в раскрытое и объемное. Такие конструкции используются для хранения и транспортировки. По необходимости они раскрываются в нужную конфигурацию. Примером раскрываемой конструкции является зонт.

Преимуществом раскрываемых конструкций являются их небольшая масса и объем в сложенном положении. В рабочем положении раскрываемые конструкции могут быть объемными и в то же время легкими. Другим преимуществом является то, что в сложенном положении конструкция может лучше выдержать нагрузки запуска. В раскрытой конфигурации конструкция подвергается только орбитальным нагрузкам, которые значительно ниже.

Большинство существующих концепций по крупногабаритным раскрываемым космическим конструкциям предусматривают наличие жестких компонентов, соединенных шарнирами, которые можно складывать. Примером таких конструкций могут служить батареи солнечные и антенны зонтичного типа представленные на рисунке 1. Жесткие конструкции могут состоять из большого количества составных частей и шарниров, которые должны работать в определенной последовательности, и которые могут, при разворачивании демонстрировать существенное нелинейное динамическое поведение.

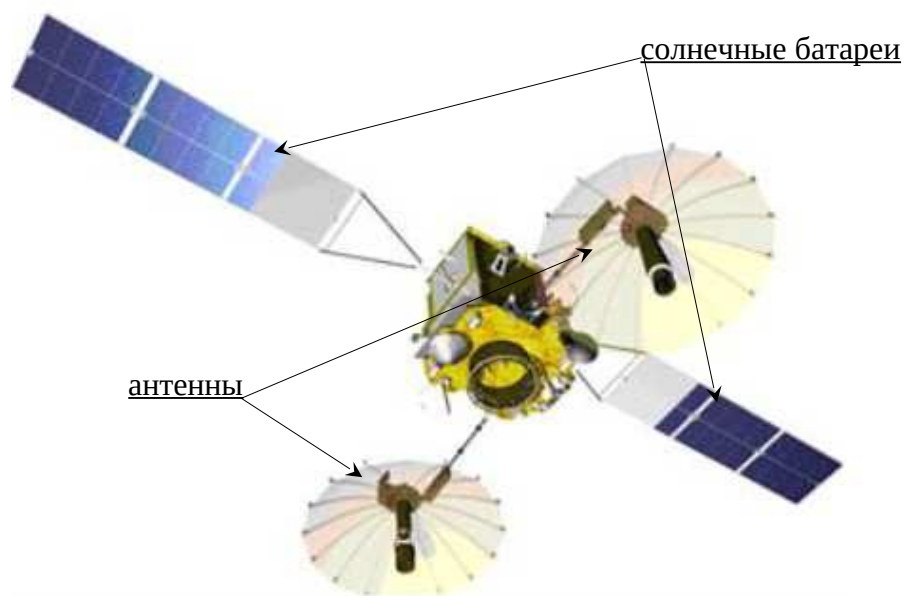


Рисунок 1 – Крупногабаритные космические раскрываемые конструкции с шарнирными соединениями

Альтернативная концепция предполагает наличие упруго-деформируемых нагруженных элементов, которые раскрываются за счет собственных сил упругости или с помощью электромеханического мотора. Пример раскрываемых конструкций на основе упруго-деформируемых элементов приведен на рисунке 2.

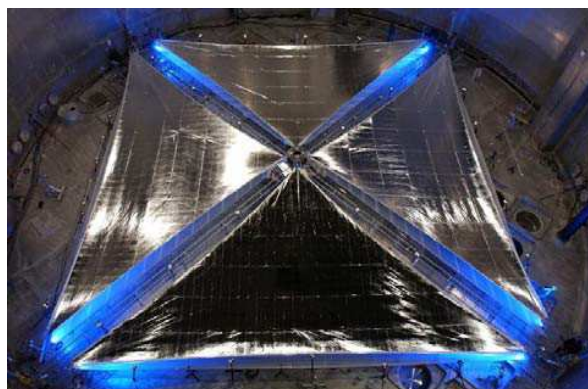
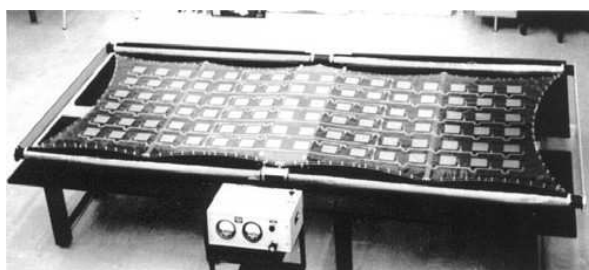
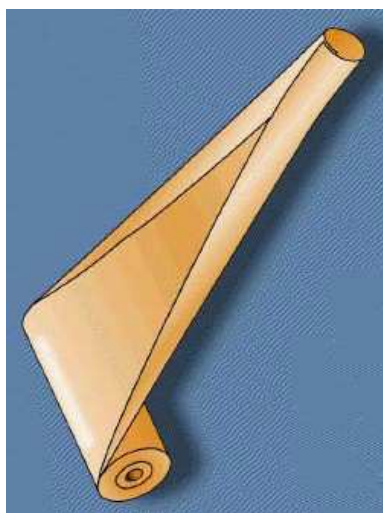


Рисунок 2 – Крупногабаритные раскрываемые конструкции на основе упруго-деформируемых элементов, для космических аппаратах

В качестве упруго-деформируемых элементов используются ленточные штыри[1], представляющие собой стержень с упруго-деформируемым

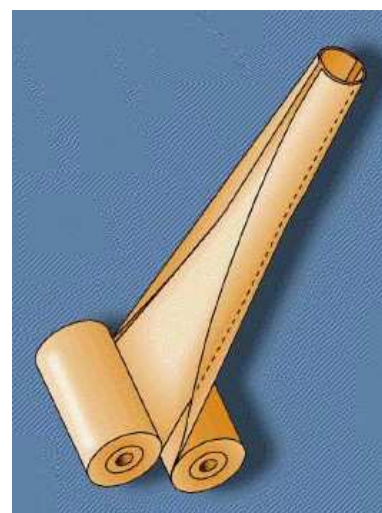
сечением. В сложенном положении сечение ленточного штыря разворачивают в прямую полосу и наматывают на барабан цилиндрической формы. При переводе в рабочее положение ленточный штырь разворачивается и принимает вид стержня с первоначально заданным поперечным сечением. Таким образом, получается компактная в сложенном положении система, способная в рабочем положении значительно увеличить свои размеры. На рисунке 3 приведен пример ленточных штырей различного сечения.



а) незамкнутое цилиндрическое сечение с перехлестом



б) чечевичное сечение



в) двойное незамкнутое цилиндрическое сечение

Рисунок 3 – Ленточные штыри различного сечения

Ленточные штыри используются для выдвижения конструкции или полезного груза на необходимое расстояние.

Выдвижение ленточного штыря может осуществляться за счет энергии деформации самого упругого элемента или с использованием электромеханического двигателя, если необходимо контролировать скорость выдвижения или несколько раз повторять процедуру выдвижения и сматывания.

При переводе из рабочего положения в сложенное, ленточный штырь получает большие перемещения соизмеримые с размерами его сечения. Большие перемещения сопровождаются значительными изменениями кривизны ленточного штыря, но в то же время, если толщина элемента мала, то деформации могут оставаться в упругой области [2].

При выдвигании, переводе из сложенного положения в рабочее, ленточный штырь будет подвергаться сжимающим усилиям, что может привести к потере устойчивости при выдвигании на большие расстояния.

Неправильный выбор конструктивных параметров, таких как радиус барабана, толщина ленточного штыря, его материал и сечение могут привести к появлению в материале пластических деформаций, изменению геометрии, поломке (разрыв профиля) или потере устойчивости в процессе выдвигания.

Целью представленной работы является определения рациональных конструктивных параметров ленточного штыря.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) анализ особенностей работы и конструкции ленточного штыря;
- 2) создание математической модели конструкции ленточного штыря;
- 3) проведение параметрических исследований зависимости напряженно-деформированного состояния (НДС) ленточного штыря от конструктивных параметров;
- 4) анализ проведенных расчетов, определение рациональных конструктивных параметров ленточного штыря.

[Изъято 65 страниц]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе:

- проведен анализ особенностей работы и конструкции ленточного штыря;
- определены геометрические характеристики чечевичного сечения;
- выполнена оценка допустимых нагрузок действующих на ленточный штырь чечевичного сечения в рабочем положении без учета зоны формирования чечевичного сечения для трех вариантов исполнения;
- выполнена оценка допустимых нагрузок действующих на ленточный штырь чечевичного сечения в рабочем положении с учетом зоны формирования чечевичного сечения для трех вариантов исполнения;
- по результатам проведенных расчетов предложен вариант доработки конструкции УВШ (введение дополнительных ограничений);
- определены значения удельного изгибающего момента и критической сжимающей силы для трех вариантов исполнения.

Результаты работы повысили качество проектирования раскрывающихся изделий и могут быть использованы для дальнейших разработок перспективных конструкций с рациональной конфигурацией в зависимости от вида нагружения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

КМ	– композиционный материал;
КЭ	– конечный элемент;
КЭМ	– конечно-элементная модель
МКЭ	– метод конечных элементов;
НДС	– напряженно-деформированное состояние;
УВШ	– устройство выдвижения штыря.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Evaluation of deployable space mast concepts: results on research study / M. Straubel, M. Hillebrandt, W. K. Belvin, – DLR, NASA, Release Date: 9.28.11. – 54p.
- 2 Андреева, Л. Е. Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева. – Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962. – 458с.
- 3 Гольденвейзер, А. Н. Теория упругих тонких оболочек / А. Н. Гольденвейзер. – Москва: Наука, 1976. – 512 с.
- 4 Новожилов, В. В. Линейная теория тонких оболочек / В. В. Новожилов, К. Ф. Черных, Е. И. Михайловский. – Ленинград: Политехника, 1991. – 656 с.
- 5 Власов, В. З. Общая теория оболочек / В. З. Власов. – Москва: Издательство академии наук СССР, 1962. – 530 с.
- 6 Сильченко, П.Н. Некоторые подходы к получению решения системы дифференциальных уравнений для элемента волноводного тракта космических аппаратов / И.В. Кудрявцев, М.М. Михнев, О.Б. Гоцелюк // Вестник Национального Исследовательского Ядерного Университета МИФИ. – 2015. – Т.4, №1. – С.19–24.
- 7 Сильченко, П.Н. Уточненное решение системы дифференциальных уравнений в задаче изгиба оболочечных конструкций волноводов / И.В. Кудрявцев, М.М. Михнев, О.Б. Гоцелюк // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2017. – № 5 – С. 4–21.
- 8 Сильченко, П.Н. Сравнительная оценка решений системы дифференциальных уравнений в задаче изгиба прямых участков волноводов космических аппаратов связи/ И.В. Кудрявцев, М.М. Михнев, О. Б. Гоцелюк // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2017. – № 1. – С. 4–23.

- 9 Годунов, С. К. Уравнения математической физики / С. К. Годунов. – Москва: Наука, 1979. – 392 с.
- 10 Годунов, С. К. Решение систем линейных уравнений / С. К. Годунов. – Москва: Наука, 1980. – 177 с.
- 11 Методы расчета стержневых систем, пластин и оболочек с использованием ЭВМ / А. В. Александров, Б. Я. Лащеников, Н. Н. Шапошников, В. А. Смирнов. – Москва:Стройиздат, 1976, Ч. 1. – 248 с; Ч. 2. – 237 с.
- 12 Вержбицкий, В. М. Основы численных методов – 2-е изд. / В. М. Вержбицкий. – Москва: Высшая школа, 2005. – 840 с.
- 13 Цейтлин, А. И. Методы граничных элементов в строительной механике / А. И. Цейтлин, Л. Г. Петросян. – Ереван:Луйс, 1987. – 200 с.
- 14 Строительная механика. Специальный курс. Применение метода граничных элементов / В. А. Баженов, В. Ф. Оробей, А. Ф. Дашенко, Л. В. Коломиец. – Одесса:Астропринт, 2001. – 288 с.
- 15 Образцов, И. Ф. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов: учебное пособие для студентов авиационных специальностей вузов / И. Ф. Образцов, Л. М. Савельев, Х. С. Хазанов. – Москва: Высшая школа 1985. – 392 с.
- 16 Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике. пер. с англ. Б. Е. Победри. / О. Зенкевич. –Москва: Мир, 1976. – 541 с.
- 17 Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа – 4-е изд., перераб. / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Москва: Издательство СКАД СОФТ, 2011. – 736 с.
- 18 Рычков, С. П. Моделирование конструкций в среде FemapwithNastran / С. П. Рычков. – Москва: ДМК Пресс, 2013. – 784 с.
- 19 Шимкович, Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN forWindows / Д. Г. Шимкович. – Москва: ДМК Пресс, 2003. – 448 с.

20 Тимошенко, С.П. Устойчивость упругих систем– 2-е изд., пер. с англ. / С. П. Тимошенко – Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. – 569с.

21 Вольмир, А.С. Устойчивость упругих систем / А. С. Вольмир. – Москва:Физматгиз, 1963. – 880с.

22 Томпсон, Дж. М. Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике – пер. с англ. / Дж. М. Т. Томпсон. – Москва: Мир, 1985. – 254с.

23 Зубчанинов, В.Г. Устойчивость и пластичность. Т.1. Устойчивость / В. Г. Зубчанинов – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 448с.

24 Пановко, Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, парадоксы и ошибки. – 4-е изд., перераб. / Я.Г. Пановко, И.И. Губанова.– Москва: Наука, 1987. – 352с.

25 Гоцелюк, О.Б. Напряженно-деформированное состояние ленточного штыря в транспортировочном положении / О. Б. Гоцелюк, И. В. Кудрявцев // Материалы XXII международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» Т.1 Красноярск, СибГАУ, 2018 – с.135 - 137.

26 Jiang-BoBai, DiChen, Jun-JiangXiong, R. AjitShenoiFoldinganalysisforthin-walleddeployablecompositeboom [Электронныйресурс] / Jiang-BoBai, DiChen, Jun-JiangXiong, R. AjitShenoi // ActaAstronautica. – 2019. – Volume 159. – Режимдоступа: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.02.014>.

27 Yu Hu, Wujun Chen, JifengGao, Jianhui Hu, Guangqiang Fang, FujunPeng A study of flattening process of deployable composite thin-walled lenticular tubes under compression and tension [Электронныйресурс] / Yu Hu, Wujun Chen, JifengGao, Jianhui Hu, Guangqiang Fang, FujunPeng // Composite structures. – 2017. – Volume 168. – Режимдоступа:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822316325715>.

28 Карпинос, Д.М. Композиционные материалы. Справочник / Д. М. Карпинос. – Киев:Наукова думка, 1985. – 592с.

29 Тарнопольский, Ю.М. Методы статических испытаний армированных пластиков – 3-е изд. перераб. и доп. / Ю. М. Тарнопольский – Москва: Химия, 1981. – 272с.

30 Писаренко, Г.С. Справочник по сопротивлению материалов – 2-е изд., перераб. и доп. / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736с.

Красноярск 2019

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт
Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 В.Е. Косенко

подпись инициалы, фамилия

« 05 » октября 2017г.

ЗАДАНИЕ

НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

в форме магистерской диссертации

Студенту: Гоцелюк Ольге Борисовне

Группа: МТ 17-04 М

Направление 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Специализированная программа подготовки: 15.04.05.02 «Технология космических аппаратов».

Тема выпускной квалификационной работы (МД): «Рациональное проектирование упруго-деформируемых тонкостенных оболочечных конструкций для космических аппаратов».

Утверждена приказом по университету от « » 20 г. №

Руководитель ВКР: В.Н. Наговицин канд. техн. наук., доцент МБК ПФиКТ

Исходные данные для ВКР: провести анализ имеющегося научно-технического задела и разработать конструкции длинномерных трансформируемых штыревых элементов для космических аппаратов.

Перечень разделов МД:


- 1 Методы расчета оболочечных конструкций в применении к расчету ленточного штыря.
- 2 Устойчивость упругих систем.
- 3 Рациональное проектирование геометрических параметров ленточного штыря чечевичного сечения.
- 4 Анализ результатов расчета.

Руководитель ВКР



В.Н. Наговицин

Задание принял к исполнению



О.Б. Гоцелюк

« 05 » октября 2017 г.